

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau ilmedia Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

H. Banse / R. Eberhardt / E. Beckert

Laserstrahllöten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme

ABSTRACT

Basierend auf der Entwicklung eines haftfesten Lotschichtsystems werden hybride optische Systeme durch eine Laserstrahllöttechnologie aufgebaut. Durch eine flussmittelfreie Prozessführung mit eutektischem Au80Sn20 wt%-Lot werden stabile, spannungsarme Lötverbindungen realisiert. Industrielle Anwendungen werden vorgestellt und diskutiert.

EINLEITUNG

Beim Aufbau hybrider optischer Systeme wird bisher hauptsächlich das Justierkleben als Fügeverfahren eingesetzt. Auf Grund der Eigenschaften der verwendeten organischen Polymere werden die optischen Systeme in ihrer Anwendung eingeschränkt.

Eine Ergänzung dieser Fügetechnik, im Hinblick auf Anforderungen bezüglich Feuchtestabilität, UV- Beständigkeit, Temperaturwechselbelastung und Langzeitstabilität ist vor allem in Bereichen wie Telekommunikation und Lithographie erforderlich. Vor diesem Hintergrund stellt das Laserstrahllöten von Optikbauteilen ein alternatives Fügeverfahren dar. Das Laserstrahllöten ist in vielen Bereichen der Halbleiterindustrie ein etabliertes selektives Fügeverfahren. Ausgenutzt wird vor allem die Eigenschaft eines räumlich und zeitlich begrenzten Energieeintrags bei gleichzeitig flexibler, verschleißfreier Prozessführung. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass dieses Potential auch zum Aufbau hybrider optischer Systeme eingesetzt werden kann.

METALLISIERUNG

Voraussetzung für den Einsatz metallischer Weichlote zum Verbinden von optischen Materialien wie BK7, Zerodur® oder SQ1 ist eine applikationsbezogene Metallisierung der Bauteile auf den zu fügenden Bereichen. Durch einen speziell entwickelten Sputterprozess ist es möglich, komplette Schichtsysteme, bestehend aus Haftschicht, Diffusionsbarriere und Lotschicht in einer Vakuumfolge zu applizieren. Das aus der Literatur [1] bekannte Unterschichtsystem, bestehend aus Ti / Pt / Au,

bildete den Ausgangspunkt der Untersuchungen. Ti fungiert als Haftvermittler, Pt als Diffusionsbarriere und Au als Benetzungsschicht für die Funktionsschicht (Lot). Versuche zur Optimierung des Schichtsystems zeigten, dass mechanisch stabile Lötverbindungen auch ohne die Au - Benetzungsschicht hergestellt werden können. Die Pt- Diffusionsbarriere ist durch Cr zu ersetzen, wenn eutektisches AuSn-Lot gesputtert werden soll. Das Gesamtschichtsystem weist eine Dicke von ca. 3,5 μm auf (Bild 1). Die Charakterisierung des Schichtsystems bezüglich der Haftung erfolgte mittels Tapetest. Es werden sehr haftfeste und reproduzierbar homogene Metallisierungen erzielt, die sich mit Dampfschattenmasken oder lithographischen Verfahren in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen strukturieren lassen. Die geringe Dicke der Lotschichtsysteme erfordert eine polierte Oberflächenqualität der Fügeflächen.

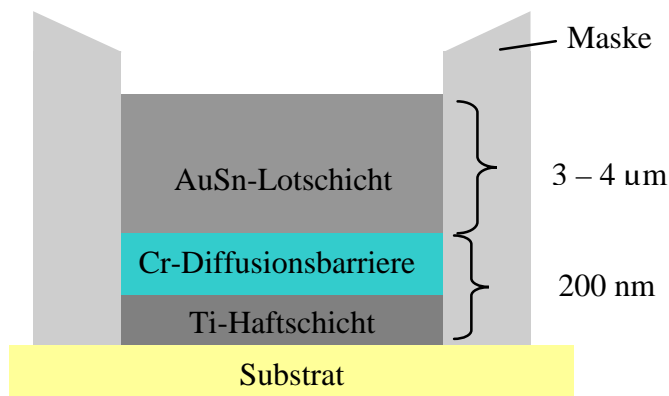


Bild 1 Metallisierungssystem (nicht maßstäblich)

Das eutektische 80Au20Sn wt% Lot wird verwendet um die bestehenden Verbindungsanforderungen, wie hohe Präzision bei geringer Kriechneigung, Temperatur- und Feuchtebeständigkeit bei gleichzeitiger flussmittelfreier Prozessführung zu erfüllen [2]. Durch die entwickelte Sputtertechnologie ist es erstmalig möglich, die Legierung als sehr dünne Lotschicht in der eutektischen Zusammensetzung zu applizieren (Bild 2) und somit dem Lötprozess vorgelagerte Reflowprozesse zum Einstellen der Legierungszusammensetzung zu vermeiden.

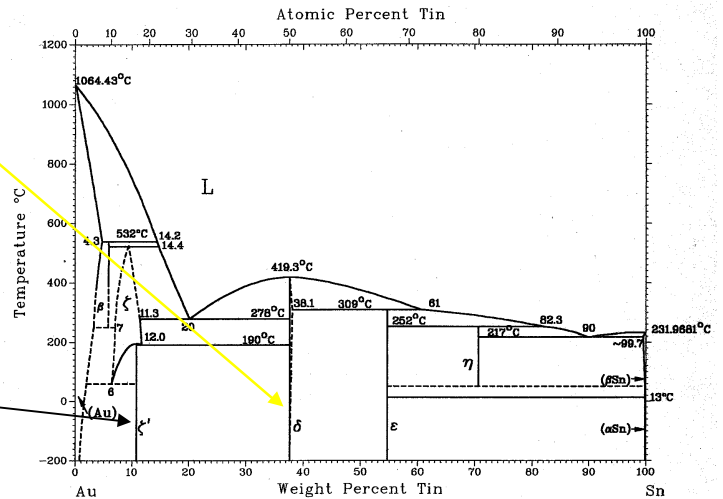
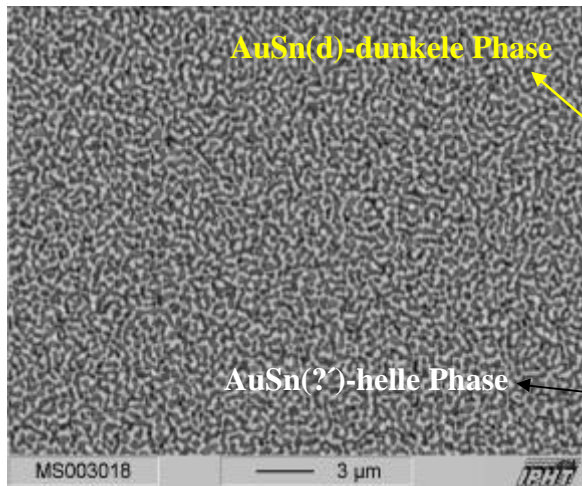


Bild 2 REM-Aufnahme der gesputterten eutektischen Legierung Au80Sn20 (wt%) und binäres Phasendiagramm System Au-Sn [Quelle ASM Binary Phase Diagrams]

ENERGIEEINKOPPLUNG

Das Laserstrahllöten beruht auf der Wechselwirkung Strahlung Materie. Trifft Laserstrahlung auf eine Oberfläche, erfolgt global eine Aufteilung in einen reflektierten, einen transmittierten und einen absorbierten Anteil. Für die Effizienz des Verfahrens ist von Interesse, welcher prozentuale Anteil im Lot resp. Metallisierung absorbiert wird und somit in Wärme umgesetzt werden kann.

Das Laserstrahllöten optischer Komponenten erfordert in der Regel eine indirekte Bestrahlung durch das Bauteil hindurch. Anwendbare Laserwellenlängen sind dadurch auf Bereiche hoher Transmission im optischen Material beschränkt (Diagramm 1).

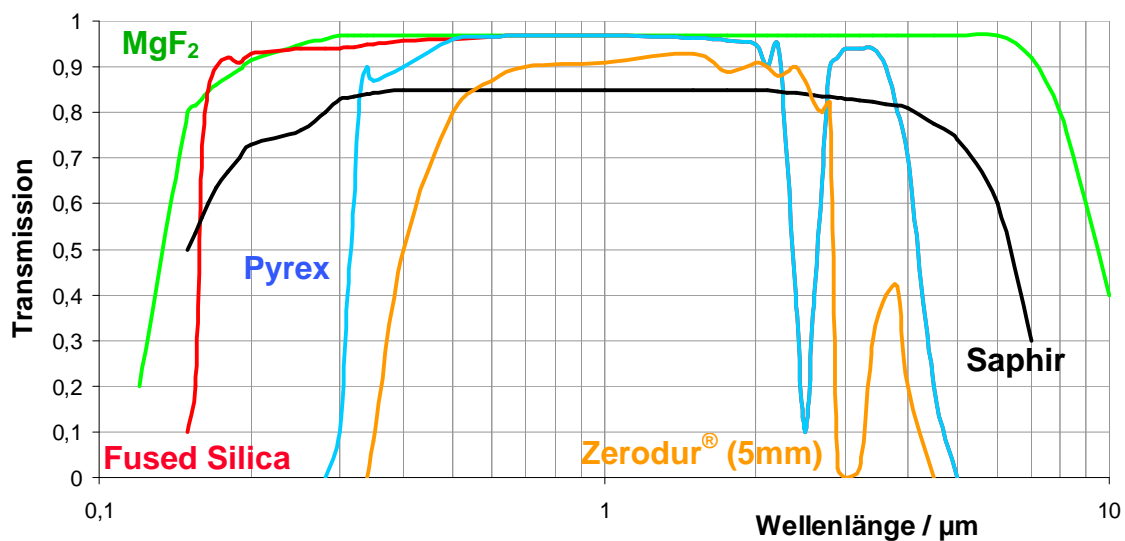


Diagramm 1 wellenlängenabhängige Transmission optischer Materialien

Ausgehend von einer zu vernachlässigenden Transmission der Laserstrahlung im Metall lässt sich aus der Bestimmung der Reflektivität die Absorption ermitteln. Bei nahe zu senkrechtem Einfall bedeutet das bei indirekter Bestrahlung für den relevanten Wellenlängenbereich einen absorbierten Anteil der Strahlung von ca. 55%. (Diagramm 2: Graph "Zerodur Ti/Cr/AuSn auf Ti" bzw. "BK7 Ti/Cr/AuSn auf Ti").

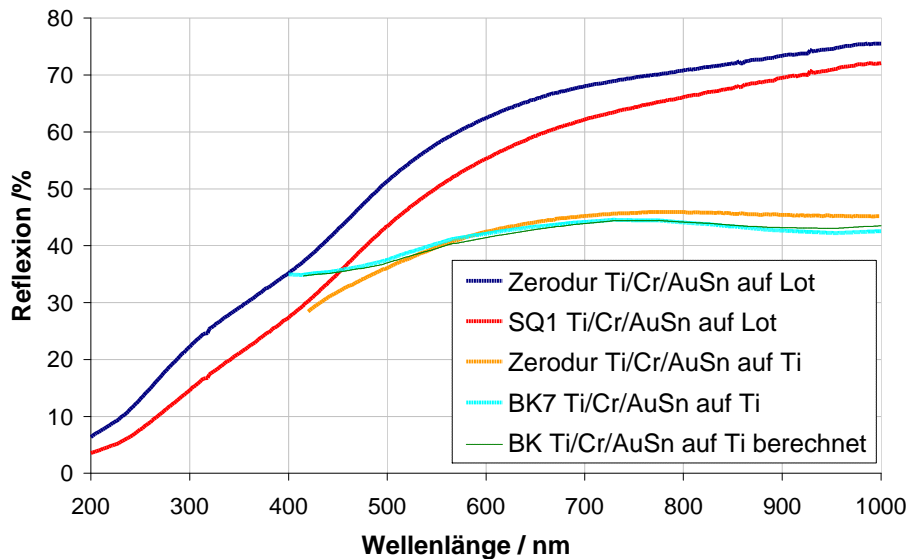


Diagramm 2 wellenlängenabhängige Reflexion am AuSn-Lot bzw. der Ti-Metallisierung
(indirekte Bestrahlung)

Absorptionskoeffizient respektive die Eindringtiefe hängen von der Wellenlänge der Laserstrahlung und den optischen Eigenschaften des Materials ab. Für Wellenlängen im Bereich zwischen 0,1 und 10µm liegen die Werte der Eindringtiefe für Metalle im nm Bereich und sind vernachlässigbar gegenüber den Werkstückabmessungen. Die Wirkung der Laserstrahlung wird deshalb als Oberflächenwärmequelle beschrieben.

FEM-SIMULATION

Bedingt durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der zu fügenden Materialien entstehen nach dem Abkühlen im Bereich der Lötverbindung mechanische Spannungen. Im Ergebnis treten beim Aufbau hybrider Systeme für das optische Material kritische Zugspannungen auf. Im folgenden wird ein thermomechanisches FEM-Modell des Laserstrahl-lötprozesses optischer Komponenten mit dünnen Lotschichtsystemen vorgestellt mit dem es möglich ist, die Spannungsbelastung der Bauteile abzuschätzen.

Angenommen wird ein Lötprozesses zum Verbinden von zylinderförmigen Körpern mit planaren,

vollständig metallisierten Fügeflächen. Das auf den Fügeflächen gesputterte Lotschichtsystem wird als jeweils 3 µm dicke Schicht der eutektischen Legierung 80Au20Sn betrachtet, Haft- und Barrierschicht werden vernachlässigt. Die verwendeten Materialdaten sind in den Tabellen 1 enthalten.

Eigenschaft	Au80Sn20	Zerodur [®]
Schmelzpunkt	278 °C	
E-Modul	59 GPa - 68 GPa	90,3 GPa
Flie遝sgrenze bei 20 °C	275 MPa	
Wärmeleitfähigkeit	57 W/mK	1,46 W/mK
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	$16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$0,2 - 1 \cdot 10^{-7} / \text{K}$ (0 °C – 50 °C)
Dichte	14,51 g/cm ³	2,53 g/cm ³
Spezifische Wärme	0,015 J/g °C	0,80 J/gK
Querkontraktion	0,405	0,243

Tabelle 1 Materialeigenschaften von Zerodur[®] und Au80Sn20-Lot

Unter Berücksichtigung der Axialsymmetrie der Körper wird ein 2D-Modell für die Simulation verwendet (Bilder 3 und 4). Die Lotschichten sind durch eine örtliche Diskretisierung von jeweils fünf Elementen modelliert. Die extrem feine Vernetzung ist erforderlich, um die zu untersuchenden Freiheitsgrade räumlich auflösen zu können. Der ideale thermische Kontakt zwischen den Lotschichten nach dem Aufschmelzen wird durch eine zusätzliche, bei Überschreiten der Schmelztemperatur zu aktivierende, 0,2 µm dicke Schicht realisiert. Der Lötprozess ist durch einen einzelnen Laserpunkt mit definierter Bestrahlungsdauer als Oberflächenwärmequelle (HFLU) dargestellt.

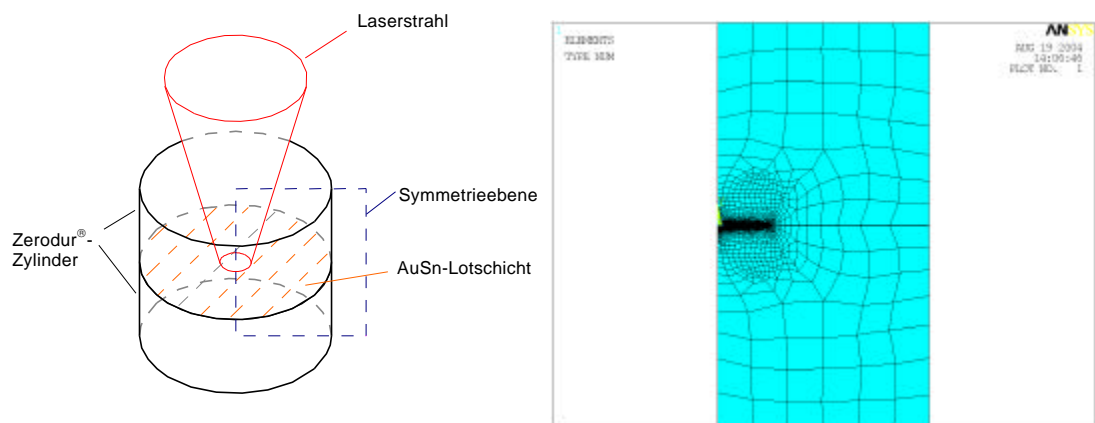


Bild 3 Modell des Laserstrahl-lötprozesses (3D-Modell und vernetzte 2D-Symmetrieebene)

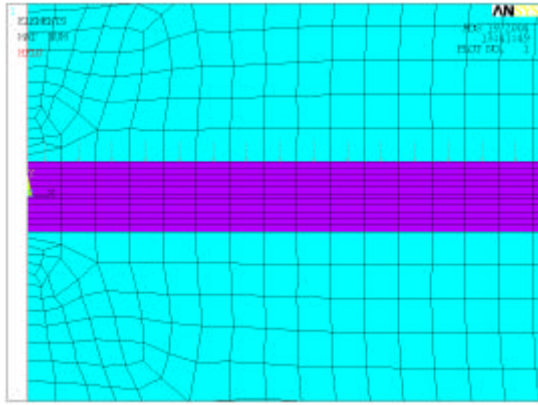


Bild 4 Ausschnitt der vernetzten Symmetrieebene im Bereich des Strahlzentrums mit Lastvektor Oberflächenwärmequelle (HFLU)

durch Konvektion und Wärmestrahlung werden vernachlässigt. Folgende Vereinfachungen werden getroffen und damit in Zusammenhang stehende Randbedingungen festgelegt:

- Zu Prozessbeginn herrscht eine definierte Temperatur von 20 °C.
- Der Wärmetransport beruht auf reiner Wärmeleitung, bei idealem thermischen Kontakt zwischen den Schichten nach Erreichen der Schmelztemperatur sowie einem abgeschätzten Wärmeübergangswert ($10^6 \text{ W/m}^2\text{K}$) nicht verbundener Bereiche.
- Es liegen adiabate Randbedingungen vor, d. h. Verluste
- Die Laserstrahlung wird als Oberflächenwärmequelle mit gaussförmiger Intensitätsverteilung nach [3] betrachtet.

Für die Berechnung des Phasenüberganges (Schmelzen des Lotes) wird die Enthalpie zur Ermittlung der Wärmekapazität genutzt.

Der Lötprozess der Materialpaarung Zerodur[®]/Zerodur[®] soll beispielhaft diskutiert werden.

Die Wechselwirkung mit der Laserstrahlung erfolgt durch einen Laserpunkt mit dem Fokusdurchmesser 0,65 mm, einer Bestrahlungsdauer von 450 ms und einer absorbierten Leistungsdichte von $6,5 \text{ W/mm}^2$. Diese Parameter entsprechen einem für die Materialpaarung Zerodur[®]/Zerodur[®] optimierten Lötprozess mit temperaturgeregelten Prozessführung (Solltemperatur 320 °C). Die einzelnen Zylinder haben einen Durchmesser von 4 mm und eine Höhe von 2 mm.

Im Ergebnis der thermischen Simulation des Lötprozesses ergibt sich am Ende des Laserpulses das Temperaturfeld nach Bild 5 (Ausschnitt der Symmetrieebene). Die Maximaltemperatur im Strahlzentrum beträgt 438 °C.

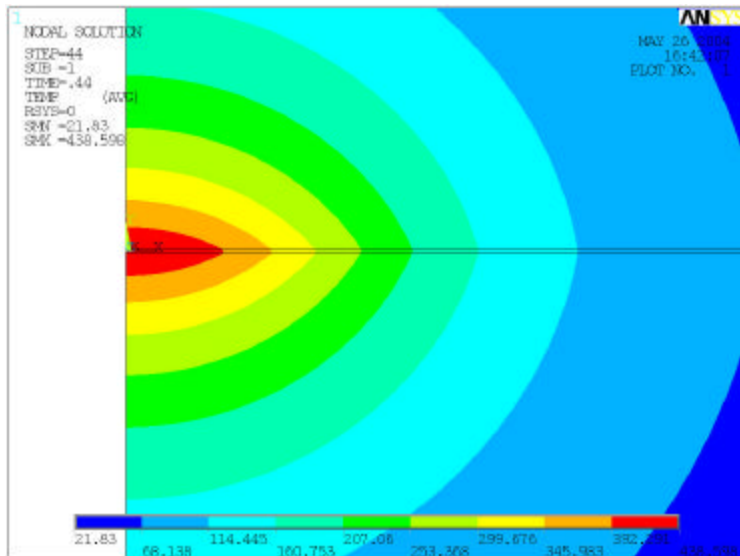


Bild 5 Temperaturfeld der gelöteten Zerodur[®] Körper nach 0,44 s, $T_{\max} = 438 \text{ °C}$

Zur Verifizierung des Modells wird über eine gedachte Pyrometermessfläche ($\varnothing 0,61 \text{ mm}$) integriert. Das entspricht der Temperaturmessung im Experiment. Es ergibt sich eine Temperatur von ca. 325 °C . Diese entspricht relativ gut dem experimentellen Wert von 320 °C (Bild 6).

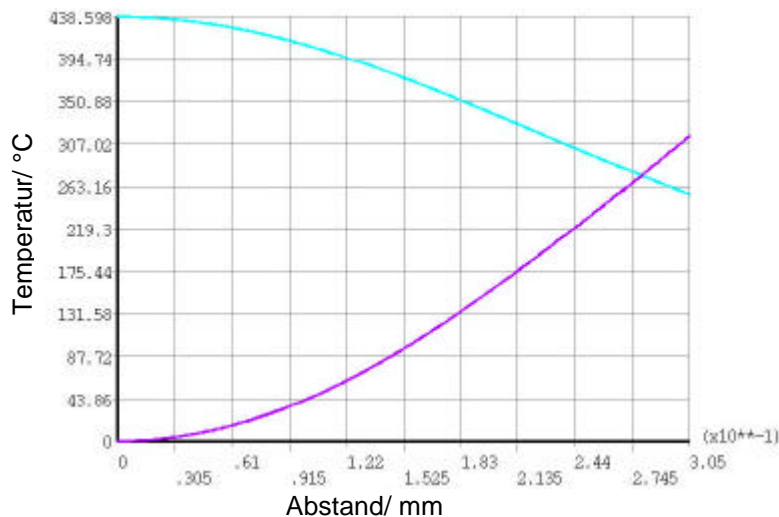


Bild 6 Temperaturverlauf über Pyrometermeßfläche (oberer Kurve Temperatur / untere Kurve über die Fläche integrierte Temperatur)

Gleichzeitig wird im Ergebnis der Simulation die geringe thermische Beeinflussung der Lötstellenumgebung deutlich. Der Bereich der Maximaltemperatur erstreckt sich bezogen auf den Strahlmittelpunkt in der x-Koordinate auf ca. 0,35 mm und in der y-Koordinate auf ca. 0,1 mm. Nach

einem Zeitraum von 3 s nach Prozessbeginn liegt im Bereich der Lötstelle bei adiabaten Randbedingungen eine Maximaltemperatur von ca. 29 °C vor (Bild 7).

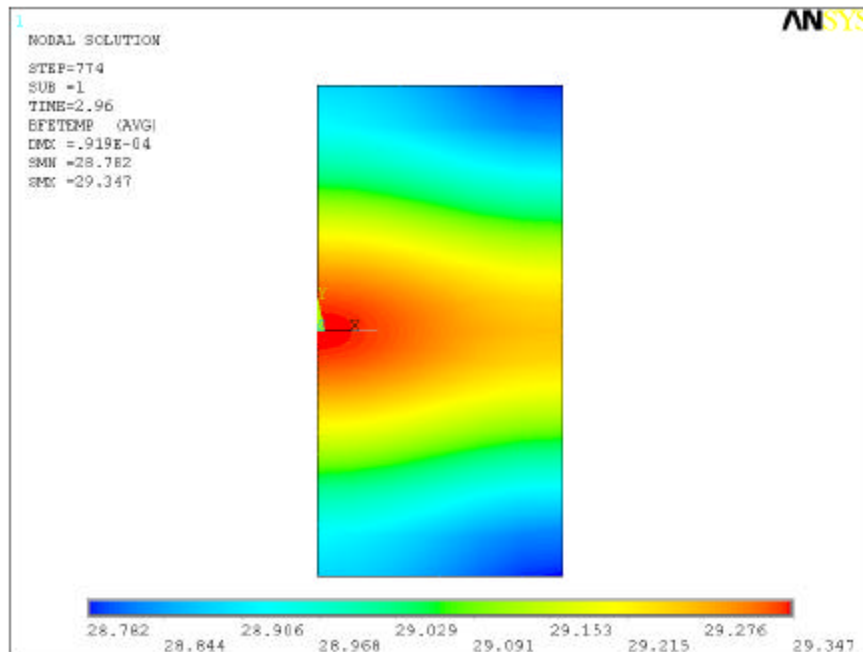


Bild 7 Temperaturfeld der gelöteten Zerodur[®] Körper nach 3 s, $T_{\max} = 29\text{ °C}$

Die Anwendung eines solchen Temperaturfeldes als Lastvektor für eine strukturelle Simulation ermöglicht die Charakterisierung der im Bereich der Lötstelle entstehenden mechanischen Belastungen. Das beschriebene Modell wird dazu durch Veränderung der Elementtypen verwendet. Grundlage bildet ein bilinear kinematisches Materialverhalten des Lotes mit plastischer Dehnung nach Überschreiten der Fließgrenze. Gleichzeitig werden, so weit bekannt, temperaturabhängige Materialdaten für die Wärmeausdehnung und den E-Modul verwendet und eine zusätzliche Drucklast aufgebracht. Die Fügezone (Bild 8 Ausschnitt der Symmetrieebene) zeigt die Spannung S1 3,5 s nach Prozessbeginn im Zerodur[®]. Diese stellt für Gläser und Glaskeramiken als betragsmäßig größte Hauptspannungskomponente in Form der Zugspannung das Versagenskriterium dar. Die Maximalspannungen von 62 MPa treten sehr lokal im Strahlzentrum auf. Diese Belastung ist für das Material ertragbar.

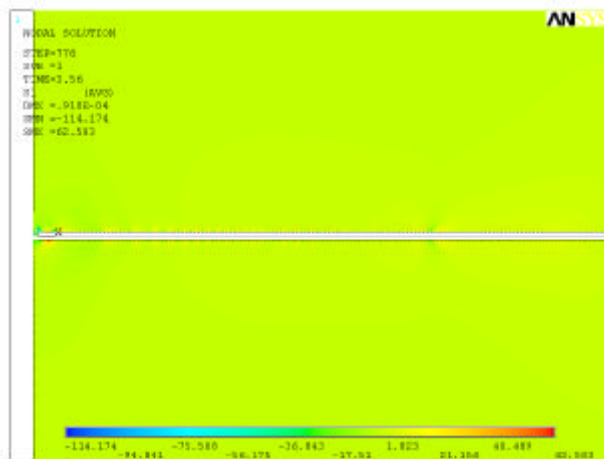


Bild 8 Spannungskomponente S1 im Zerodur® (Fügezone) nach 3,5 s, $S1_{\max} = 62 \text{ MPa}$

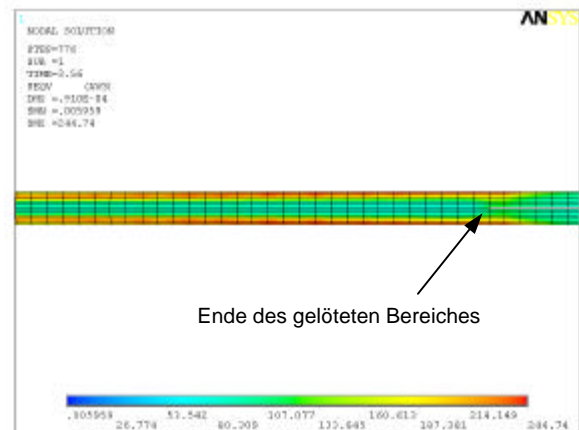


Bild 9 Vergleichsspannung in der Lotschicht im Randbereich der Fügezone nach 3,5 s, $SEQV_{\max} = 244 \text{ MPa}$

Zur Beurteilung der Beanspruchung von Metallen wird die von-Mises Vergleichsspannung verwendet. Im Randbereich der Fügezone treten in der Lotschicht Maximalwerte von 244 MPa direkt am Übergang zum Zerodur® auf (Bild 9). Das Lot wird somit bis in den Bereich der Fließgrenze belastet.

Das Ergebnis der mechanischen Simulation verdeutlicht die geringe, lokal begrenzte mechanische Belastung der gelöteten Baugruppe. Verbindungen gleichartiger Zerodur®-Bauteile durch dünne AuSn-Lotschichten können somit durch einen Laserstrahl­lötprozess hergestellt werden. Eine experimentelle Verifikation der Simulationsergebnisse findet sich in stabilen, rissfreien Lötverbindungen von Zerodur®-Bauteilen auf die in den folgenden Applikationen genauer eingegangen wird.

LASERSTRAHLLÖTANLAGE

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit fasergekoppelten Hochleistungslasern (30 W @ 808 nm Bild 10, 90 W @ 950 nm Bild 11) durchgeführt. Diese sind an unterschiedliche Positioniersysteme gekoppelt. Die Temperaturmessung erfolgt jeweils mit in den Bearbeitungskopf integrierten Einfarbenpyrometern bei einer Messwellenlänge von $2,04 \mu\text{m}$.

Durch verschiedene Vorsatzoptiken können unterschiedliche Fokusdurchmesser bei entsprechenden Arbeitsabständen realisiert werden. Die Kaustik/ Leistungs­dichteverteilung einer Standardoptik (30 W System, Brennweite 60mm, im Fokus $\varnothing 0,37 \text{ mm}$, 86% der Leistung) zeigt Bild 12. Die x-y Schnitte verdeutlichen die glockenförmige Leistungs­dichteverteilung in Fokuslage.



Bild 10

$P_{\max} = 30 \text{ W}$, cw, $\lambda = 810 \text{ nm}$,

FokusØ / Arbeitsabstand:

0,65 mm / 95 mm - 0,29 mm / 25 mm

Portalsystem X-Y-Z:

250 x 250 x 200 mm $\pm 10 \mu\text{m}$

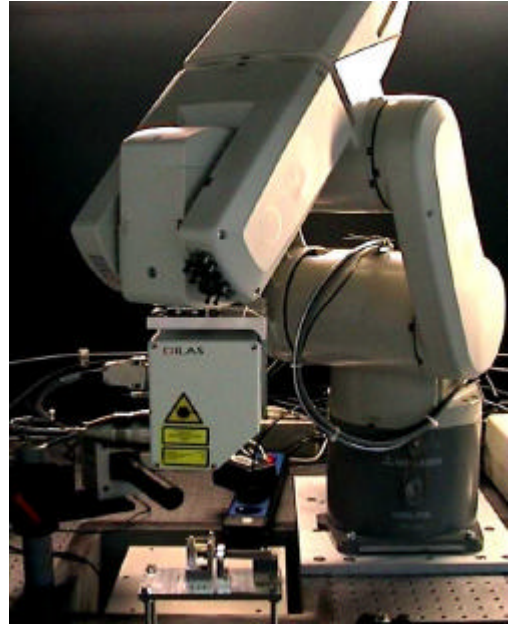


Bild 11

$P_{\max} = 90 \text{ W}$, cw, $\lambda = 950 \text{ nm}$,

FokusØ / Arbeitsabstand:

1,2 mm / 95 mm - 0,65 mm / 25 mm

Sechs-Achs -Knickarmroboter $\pm 30 \mu\text{m}$

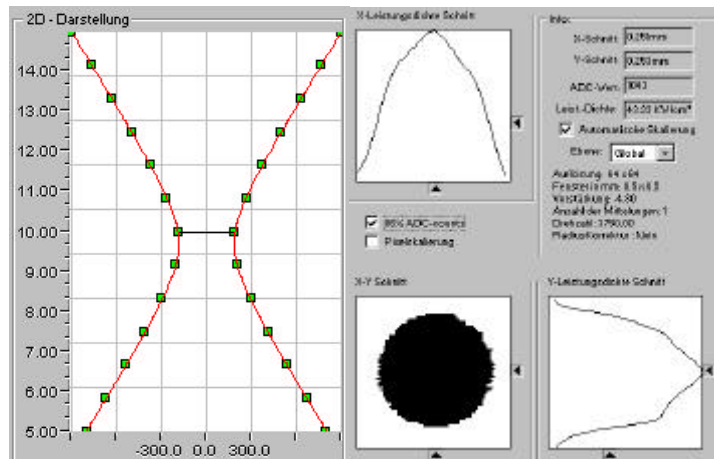


Bild 12 Kaustik und Leistungsdichteverteilung einer 60mm Optik [Quelle DILAS]

Um die hohen Forderungen der Lagegenauigkeit der Bauteile hybrider optischer Systeme zu erfüllen, sind in den jeweiligen Lötlaser angepasste Justageeinrichtung zu integrieren.

CHARAKTERISIERUNG

Die für die Lötverbindung charakteristische Gefügeausbildung in der Verbindungszone beeinflusst wesentlich die Eigenschaften der Verbindung wie mechanische Festigkeit oder Vakuumdichtigkeit. Bild 13 zeigt eine REM-Aufnahme der Gefügeausbildung der eutektischen Lotlegierung Au80Sn20 wt% gelöteter BK7-Vergleichsproben.

Die relativ gleichmäßige Gefügestruktur belegt einen für die Verbindungsbildung günstigen Temperatur - Zeitverlauf in der Fügezone. Das Aufbringen einer zusätzlichen Andruckkraft während des Lötprozesses verbesserte die Gefügeausbildung signifikant, während Kippungen der zu fügenden Flächen durch das Lot nur sehr begrenzt ausgeglichen werden können und die Verbindungsbildung beeinträchtigen. Erkennbar ist weiterhin eine lamellare Struktur des Gefüges.

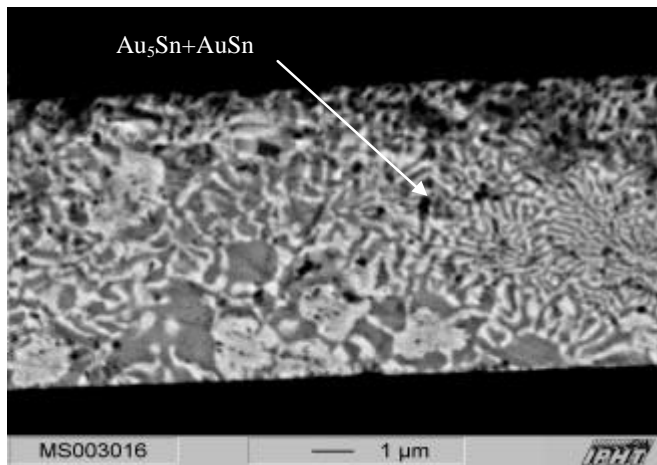


Bild 13 Gefügaufbau einer Au80Sn20 wt% Lötverbindung

Durch Abscherversuche wurden Festigkeitswerte von $\tau_s = 50 \text{ MPa}$, $\sigma = 20 \text{ MPa}$ der Lötverbindungen ermittelt [4].

APPLIKATIONEN

An zwei Applikationen wurden die durch die Verbindungstechnologie entstehenden Fügetoleranzen charakterisiert.

Bild 14 zeigt eine miniaturisierte Zerodur[®]-Spiegelbaugruppe als Demonstrator für ein Tischsystem mit exaktem Metrologieanschluss für Lithographieanlagen. Die Fügetoleranzen wurden als orthogonaler und pyramidaler Winkelfehler (Kippung) der Achsen der einzelnen Spiegelflächen mit Autokollimationsfernrohren (AKF) ermittelt. Durch Lötprozess entstehen Toleranzen von 1 – 5 arcsec. Dieser Zustand veränderte sich über einen Zeitraum von ca. einen Jahr um 1 – 5 arcsec.

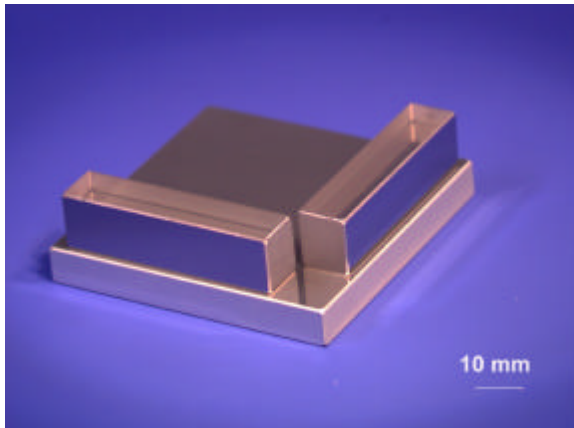


Bild 14 Demonstrator miniaturisierte Zerodur®-Spiegelbaugruppe

Bild 15 zeigt einen Demonstrator für ein Zerodur®-Spiegelsystem für eine Nanomeßmaschine. Der Einzelspiegel wurde in dieser Applikation vor dem Lötprozess über zusätzliche Klebefallen fixiert. Die detektierte Kippung der Spiegelfläche lag nach dem Lötprozess sowie nach umfangreichen klimatisch mechanisch dynamischen Prüfungen (trockene/feuchte Wärme, Schwingungen, Kälte) in einem Bereich kleiner 1 arcsec.

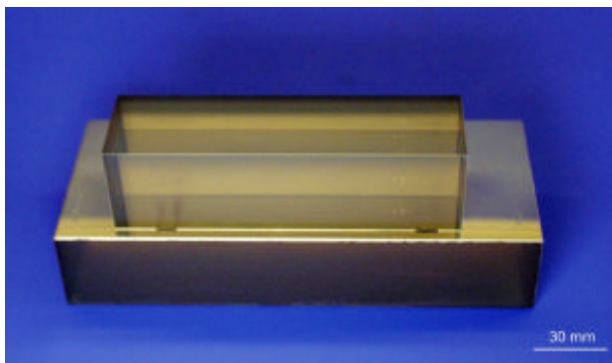


Bild 15 Demonstrator Zerodur®-Spiegelsystem

Die vorgestellten Applikationen belegen das Potential der Verbindungstechnologie zum Aufbau präziser, langzeitstabile AuSn- Lötverbindungen. Die Charakterisierung der Ebenheit der Spiegelflächen der miniaturisierten Zerodur®-Spiegelbaugruppe unterstützt diese Aussage. Anhand interferometrischer Messungen wurden Abweichungen der Ebenheit durch Beschichtungs- und Lötprozess festgestellt. Der ermittelte PV-Wert von ca. 30 nm (Bild 17) entspricht bei einer Messwellenlänge von 632 nm einer Veränderung zwischen Ausgangszustand und gelötetem Zustand von $< \lambda/20$ und belegt damit die geringe Beeinflussung der Komponente durch die Verbindungstechnologie.

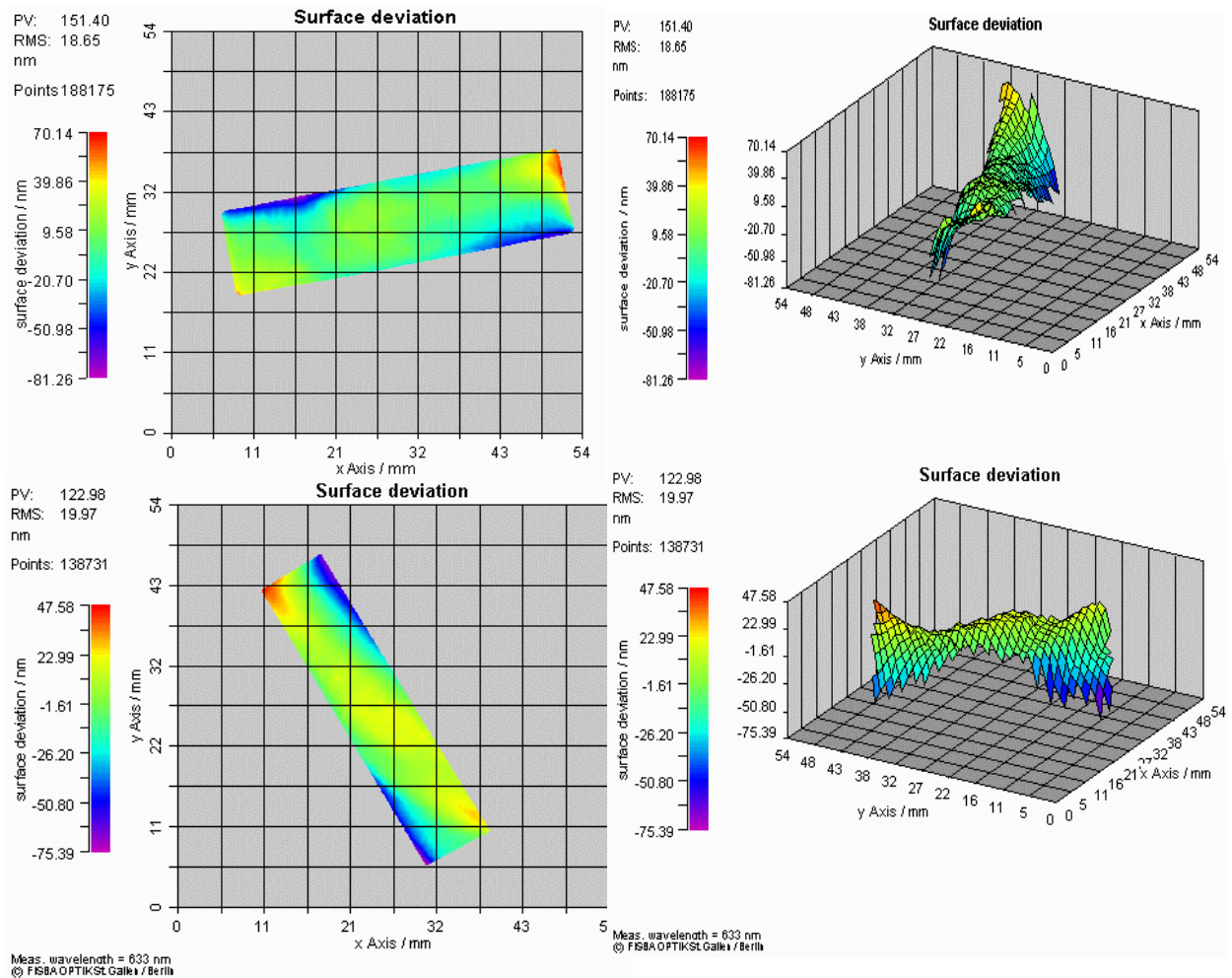


Bild 17 Ebenheit (PV / nm) einer Spiegelfläche, miniaturisierte Spiegelbaugruppe, Ausgangszustand (oben), gelötet (unten)

ZUSAMMENFASSUNG

Für hybride optische Systeme aus BK7 und Zerodur[®] wurde eine neuartige, auf dem Laserstrahl­lötprozess basierende, flussmittelfreie Verbindungstechnologie in Form einer industrietauglichen Lösung entwickelt. Die Lötverbindungen weisen eine hohe mechanische Festigkeit auf. Unter Voraussetzung einer definierten Rauigkeit und Ebenheit der Fügeflächen werden sehr geringe Fügetoleranzen der Lötverbindungen detektiert. Diese bleiben auch nach umfangreichen klimatischen und mechanisch dynamischen Prüfungen nahezu konstant. Die entwickelten Laserstrahl­löttechnologie stellt somit die Grundlage für eine neue hochwertige Fertigungstechnologie für hybride optische Systeme dar. Unterschiedliche Applikationen, darunter ein Demonstrator für eine Zerodur[®]-Spiegelbaugruppe, wurden realisiert

Literatur:

- [1] Pittroff, et al.: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 24, No.4 (2001)
- [2] Scheel, W.: Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung. Templin:Verlag Markus A. Detert, 2002
- [3] Beyer, E.: Wissenbach, K.: Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung. Springer Verlag, 1998
- [4] Banse, et al.: Microsystems Technologies 11, pp.186-193 (2005)

Autorenangabe(n):

Henrik Banse
Dr. Ramona Eberhardt
Erik Beckert
Fraunhofer IOF, Albert Einstein Str. 7
Jena
Tel.: 03641/807339
Fax: 03641/807604
E-mail: henrik.banse@iof.fraunhofer.de